

# Air-Based Mobile Urban Sensing – Copters as Sensor Carriers in Smart Cities

*Benjamin Allbach, Patrick Leiner*

(Dipl.-Ing. Benjamin Allbach, Hochschule Kaiserslautern, University of Applied Sciences, Dept. of Engineering and Dept. of Building and Design, Morlauerer Straße 31, 67657 Kaiserslautern, benjamin.allbach@fh-kl.de)  
(B.Sc. Patrick Leiner, Hochschule Kaiserslautern, University of Applied Sciences, MINT-Workshops, Morlauerer Straße 31, 67657 Kaiserslautern)

## 1 ABSTRACT

Smart Cities sind nur durch den allgegenwärtigen und alldurchdringenden Einsatz von Sensoren umsetzbar. Eine Vielzahl von Sensor-Arten und Sensor-Trägern sind nötig, um eine smarte, städtische Struktur und damit einhergehend, eine smarte Umwelt, ein smartes Leben, mit einer smarten Bevölkerung sowie eine smarte Wirtschaft, eine smarte Verwaltung und eine smarte Mobilität zu schaffen. Für all dies braucht es aber smarte Fachkräfte, die schon früh durch eine spezielle MINT-Förderung neugierig auf Technik gemacht werden müssen und speziell gefördert werden sollten. Abgesehen von dem klassischen Top-down Verfahren der Sensornutzung wie beispielsweise die Fernerkundung und der Einsatz von Bottom-up Methoden wie zum Beispiel die Nutzung von embeded systems (u. a. Smartphones), die die Bevölkerung täglich mit sich führt, könnte dabei ein neues Träger-System eine wichtige Rolle spielen. Dieser Träger-Typ wird als Multicopter oder auch oft umgangssprachlich als Drohne bezeichnet und bietet die Möglichkeit einer aeronautischen Plattform für eine mobile Sensornutzung. Im vorliegenden Paper werden dabei drei selbstentwickelte Quadrocopter vorgestellt, die als Sensor-Träger fungieren können und aufzeigen, wie beispielsweise Klimadaten mit einem Quadrocopter aufgezeichnet werden können. Einer dieser vorgestellten Coptern ist zum großen Teil aus einem kostengünstigen 3D-Drucker erstellt. Ein weiterer Copter wird so ausgelegt sein, dass er eine möglichst lange Flugzeit aufweisen wird. Dies ist besonders wichtig, da in Smart Cities Umwelteinflüsse aus der Luft über einen längeren Zeitraum zu detektieren sind. Ebenso ist es ein weiteres Ziel des Papers, darzustellen, ob die Systemeffizienz des Multicopters durch das Verarbeiten von effektiv eingesetzter Solartechnik gesteigert werden kann. Ferner werden die verschiedenen Arten von Multicopter-Typen mit ihren grundlegenden Konstruktions- und Theoriegrundlagen beschrieben und die rechtlichen Gegebenheiten, Gefahren und Nutzungsbedingungen erläutert.

## 2 QUADROCOPTER

### 2.1 Definition

Die Namensgebung des Quadrocopters leitet sich im technischen Sinne von den sogenannten Multicoptern ab. Ein Multicopter ist nach Definition ein Hubschrauber, welcher mehr als einen Rotor besitzt [vgl. BACHFELD, 2013, S 42]. Ein Multicopter kann demnach von mehreren Rotoren angetrieben werden. Der Quadrocopter weist vier Rotoren auf und wird hierdurch namentlich als solcher gekennzeichnet. Diese Fluggeräte besitzen eine ähnliche Steuerung und ein Flugverhalten wie ein Hubschrauber und werden somit als eine Sonderform dessen definiert [vgl. Büchi, 2013a:9F]. Alle Multicopter und somit auch die Ausprägung des Quadrocopters werden ebenso im Allgemeinen und im vorliegenden Paper als Drohnen bezeichnet [vgl. Westphal, 2015]. Ebenfalls wird im englischen Sprachraum von Unmanned Aerial Vehicle“ (UAV) oder „Unmanned Aerial System“ gesprochen. Im deutschsprachigen Raum wird oftmals nach Duden auch die Schreibweise „Kopter“ verwendet.

### 2.2 Bestandteile

Ein Quadrocopter besteht aus mehreren Komponenten, welche spezifische Aufgaben erfüllen und in einem System zusammenarbeiten müssen. Das Fluggerät besteht im Wesentlichen aus einer Rahmenkonstruktion, den Motoren, Motorreglern, Luftschrauben, einem Akkumulator, einem Flightcontroller und einer Fernsteueranlage.

#### 2.2.1 Rahmen

Der Rahmen eines Quadrocopters hat die Aufgabe, alle Bauteile des Fluggerätes aufzunehmen und zu fixieren. Hauptsächlich besteht er aus einem Mittelstück, welches auch Centerplate genannt wird und den Auslegern als Verbindungsstück zu den außen angebrachten Motoren dient. Die Centerplate dient vor allem dem Zusammenhalt aller mechanischen Komponenten sowie der Aufnahmen des Flightcontrollers, das

Herzstück des Quadrocopters [vgl. BACHFELD, 2013:44FF]. In der Luftfahrt werden überwiegend die Materialien Glasfaserverbundstoffe, Kohlenfaserverbundstoffe, Aluminium und Titan im Bau verwendet [GARTNER, 2009: 7FF]. Da Kohlenfaserverbundwerkstoffe (CFK) gegenüber Glasfaserverbundwerkstoffen (GFK) oder Stahl ein relativ geringes, spezifisches Gewicht, bei gleichzeitig hoher Zugfestigkeit aufweisen, wird dieser Werkstoff auch im Multicopter-Rahmenbau sehr oft eingesetzt (Abb. 1 links). Zur Realisierung einer konstruktiv erarbeiteten Quadrocopter-Rahmenkonstruktion kann ebenso ein 3D-Drucker verwendet werden. In diesem Fall muss die Konstruktion an die spezifischen Eigenschaften des verwendeten Druckmaterials wie PLA oder ABS sowie an das spezielle Herstellungsverfahren des 3D-Drucks angepasst werden [vgl. GEBHARDT, 2013:70ff].

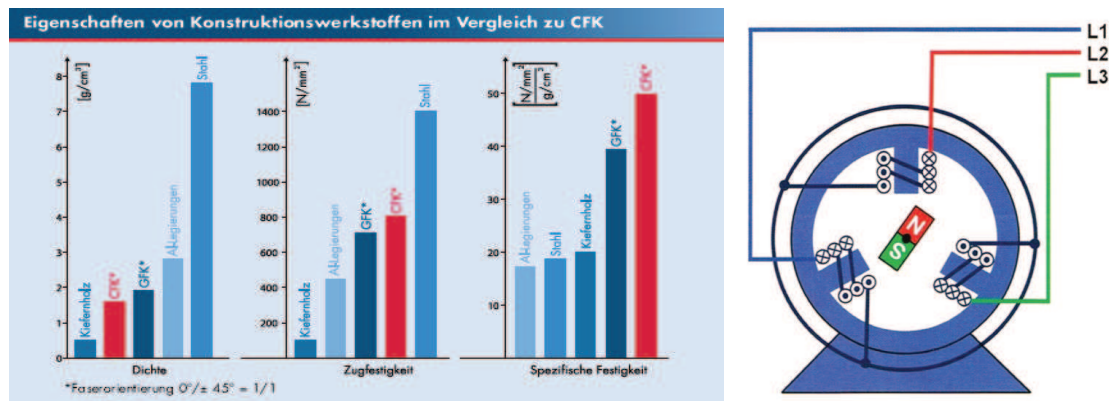


Abb. 1: Werkstoffe & Motor [Quelle: WWW.BENTELER-SGL.DE & BÜCHI, 2013b:16].

### 2.2.2 Motoren

In Quadrocoptern sowie generell im Multicopterbau kommen heute überwiegend bürstenlose Brushlessmotoren (Abb. 1 rechts) zum Einsatz. Vorteil dieser Motorenbauart ist die Tatsache, dass diese keine Kohlebürsten besitzen, welche in den Vorgängermodellen, den Gleichstrombürstenmotoren, das Hauptverschleißteil darstellten. Die Permanentmagnete befinden sich im Falle der Brushlessmotoren auf dem Rotor, was eine Stromübertragung auf ein rotierendes Bauteil überflüssig macht. Aus diesem Grund besitzen die Brushlessmotoren eine höhere Lebensdauer und Effizienz [vgl. BÜCHI, 2013a:17].

### 2.2.3 Brushlessregler (ESC)

Die Ansteuerung eines Brushlessmotors erfolgt immer über einen speziellen Brushless-Motorregler. Dieser wird auch als ESC (electronic speed controller) bezeichnet. Er steuert den Stromfluss zum Motor und sorgt für einen Drehstrom über drei Anschlusskabel [vgl. BACHFELD, 2013:46FF].

### 2.2.4 Luftschrauben

Die Luftschrauben sorgen für den notwendigen Schub, um einen Quadrocopter abheben zu lassen. Der Brushlessmotor treibt diese an. Durch ihre geschwungene Form drücken sie während des Betriebs die Luft nach unten. Luftschrauben werden über zwei wichtige Kennzahlen definiert, der Durchmesser und die Steigung. Der Durchmesser gibt die Gesamtlänge der Luftschraube an. Die Steigung definiert die theoretische Vorwärtsbewegung der Luftschraube nach einer Umdrehung. Beide Kennzahlen werden in Zoll angegeben. Eine Luftschraube mit der Bezeichnung 10x4,7 besitzt einen Durchmesser von 10 Zoll sowie eine Steigung von 4,7 Zoll [vgl. BACHFELD, 2013:47].

### 2.2.5 Akkumulator

Der Akku eines Quadrocopters trägt im hohen Maße zur Effizienz des Fluggerätes bei. Heute werden im Flugmodellbau vor allem Lithium-Polymer-Akkumulatoren (LiPos) verwendet. Der Vorteil dieser Technologie liegt in ihrer hohen Energiedichte. Diese gibt an, wie viel Energie ein Akkutyp pro Eigengewichtsanteil speichern kann. Früher eingesetzte Nickel-Cadmium (NiCd) oder Nickel-Metall-Hydrid (NiMH) Akkus weisen im Durchschnitt eine Energiedichte von 5 bis 7 Watt pro 100 Gramm Eigengewichtsanteil auf. LiPos kommen hier im Durchschnitt schon auf eine Energiedichte von 14 Watt pro 100 Gramm [vgl. LENZ, 2015]. Eine LiPo Zelle besitzt immer eine Nennspannung von 3,7 Volt. In der Regel werden diese zu einem LiPo-Pack von 3-4 Zellen seriell geschlossen, was eine Gesamtnennspannung von 11,1 Volt oder 14,8 Volt ergibt [vgl. BÜCHI, 2013a:20]. Die hohe Energiedichte sowie der chemische

und technische Aufbau birgt jedoch auch Gefahren. Wird eine Zelle unter 2,5 Volt entladen oder über 4,25 Volt geladen, kann der Akku geschädigt werden und beginnen zu brennen [vgl. PASSERN, 2013:20FF]. Um das zu verhindern, werden alle Zellenspannungen am sogenannten Balancerkabel ausgegeben und können überwacht werden [vgl. BÜCHI, 2013a:30F].

### 2.2.6 Flightcontroller

Der Flightcontroller ist sozusagen das Gehirn eines Quadropters. Er ist mit Gyroskop-Sensoren, Beschleunigungssensoren und weiteren optionalen Sensoren, wie Barometer oder GPS bestückt. Die Sensoren messen die aktuelle Lage des Fluggerätes. Der Flightcontroller errechnet über eine PID-Reglerschleife die Abweichung zur stabilen Fluglage und regelt diese über einen Informationsfluss zu den Brushlessregler. Diese wiederum passen dementsprechend die Drehgeschwindigkeit der Motoren an [vgl. BACHFELD, 2013:45FF]. Ebenso fließen die Steuerbefehle des Piloten mit Hilfe einer Fernsteuerung in die Flugberechnung mit ein, wodurch das Fluggerät durch den Piloten steuerbar wird.[vgl. BÜCHI, 2013a:14].

## 2.3 Risiken & Gefahren

Ein Quadrocopter besitzt ein nicht unerhebliches Gefahrenpotential. Im Wesentlichen können beim Betrieb solch eines Fluggerätes zwischen den Gefahren durch drehende Rotoren, dem Gefahrenpotential der verwendeten Lithium-Polymer-Akkus sowie dem Risiko eines Ausfalls in der Luft und dem damit verbundenen Absturz, unterschieden werden. Je größer die verwendeten Luftschrauben sind, desto ernsthafter sind die potentiellen Verletzungen, welche durch den Propeller verursacht werden können. Ist die Luftschraube aus einem hoch stabilen Carbon-Material gefertigt, steigt das Gefahrenpotential um ein Vielfaches [vgl. BRUNNER, 2015]. Lithium-Polymer-Akkumulatoren besitzen eine relativ hohe Energiedichte. Allerdings weist diese hierdurch sowie aufgrund ihres chemischen und konstruktiven Aufbaus eine gewisse Sensibilität gegenüber Unter- und Überladen einer einzelnen Akkuzelle auf. Wird eine Zelle unter 2,5 Volt entladen oder über 4,25 Volt geladen, kommt es zur Schädigung der Zelle [vgl. PASSERN, 2013:20FF]. Auch durch eine mechanische Beschädigung aufgrund eines Absturzes wird der Akku zu einer Gefahr. Ein Defekt des Akkus äußert sich im sogenannten Ausgasen, womit der Austritt von gefährlichen Stoffen, wie etwa Wasserstoff gemeint ist. In diesem Fall besteht höchste Brand- und Explosionsgefahr [vgl. BÜCHI, 2013a:20FF]. Kommt es zu einem LiPo-Brand, ist dieser nicht mit Wasser zu löschen. Hierfür muss eine Löschdecke oder ein Pulverfeuerlöscher verwendet werden. Beim Absturz eines Quadrocopter besteht ebenso ein sehr hohes Gefahrenpotential. Die gesamte Energie des Falls wird am Boden freigesetzt. Hier stellen die Motoren die größte Gefahr dar [vgl. BRUNNER, 2015]. Eine weitere Gefahr bzw. Handicap ist der Wind. Bis ca. 50 km/h Windgeschwindigkeit ist das generelle Fliegen möglich, wobei bei ca. 30 km/h die Aufnahmesituation von Bildmaterial aller Art derzeit fast unmöglich wird [vgl. IKEN, 2016].

## 2.4 Gesetze & Versicherungen

Bei den Gesetzen und Versicherungen ist zu beachten, dass es keine international einheitliche Regelung, Gesetze und Versicherungen gibt. Im Bundesverkehrsministerium wird aktuell noch über eine Art „Führerschein“ für Drohnen diskutiert. Oftmals unterscheiden sich die Gesetze von Staat zu Staat. Beispielsweise benötigt man eine Aufstiegserlaubnis für Österreich („Betriebsbewilligung von unbemannten Luftfahrzeugen“) und diese wird von der Luftfahrtbehörde „Austro Control“ erteilt. Bei Austro Control sind dafür umfassende Unterlagen einzureichen. Drohnen und Quadrocopter fallen in Österreich in der Regel in die Klasse 1 (unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 mit Sichtverbindung). Die Luftfahrzeuge sind auf ein Gewicht von 150kg begrenzt und dürfen (wie auch in Deutschland) nur mit Sichtverbindung geflogen werden. Die Flughöhe ist auf maximal 150m limitiert [vgl. WESTPHAL, 2015]. Der Betrieb eines Quadropters ist in Deutschland nicht uneingeschränkt erlaubt. Vielmehr müssen vor jedem Flug eines Quadropters gewisse rechtliche Aspekte und Gesetze beachtet werden. Mit dem 14. Gesetz zur Änderung des Luftverkehrsgesetzes (LuftVG) sind zivile Drohnen anerkannte Luftfahrzeuge und können sich damit nicht mehr in einer Art rechtsfreien Raum bewegen [vgl. SOLMECKE; NOWAK, 2014]. Rechtsgrundlage für die Zuordnung der geltenden Verordnungen und Gesetzen, ist die Definition, ob es sich beim Betrieb des Fluggerätes um ein Flugmodell oder um ein unbemanntes Luftfahrtsystem (UAS = Unmanned Aerial System) handelt. Ein Flugmodell wird zur reinen Freizeitgestaltung und als Sport betrieben. Ist dies nicht der Fall, gilt der Quadrocopter automatisch als unbemanntes Flugsystem [vgl. BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2014]. Wiegt ein Quadrocopter mehr als 5 Kilogramm

ist es nicht von Bedeutung, ob dieser lediglich zu Freizeit Zwecken eingesetzt wird oder nicht. In diesem Fall wird das Fluggerät immer als unbemanntes Flugsystem eingestuft [vgl. NOÉ, 2015]. Grundsätzlich wird immer im ersten Schritt eine spezielle Haftpflichtversicherung (eine „normale“ Haftpflichtversicherung reicht nicht aus) für ein Flugmodell oder ein UAS benötigt, um alle eventuell entstehenden Schäden abzudecken [vgl. Luftvg §43]. Weiterhin ist der Aufstieg eines UAS immer erlaubnispflichtig. Solch eine Einzel- oder Allgemeinerlaubnis muss beim zuständigen Landesamt beantragt werden. Ein Quadrocopter muss zudem immer in Sichtweite, mindestens 1,5 Kilometer entfernt zu einer Flughafenbegrenzung und unter Einhaltung aller geltenden Luftfahrtregeln und Gesetzen betrieben werden [vgl. LANDESBETRIEB MOBILITÄT RHEINLAND-PFALZ, 2015]. Hierzu zählt vor allem, dass ein Quadrocopter nicht in kontrollierten Lufträumen geflogen werden darf. Hierfür kann jedoch ebenso eine Fluggenehmigung eingeholt werden.

### 3 NUTZUNG VON MULTICOPTER IM STÄDISCHEN RAUM

In den letzten Jahren hat sich die Entwicklung von Drohnen enorm weiterentwickelt. Derzeit werden Drohnen vermehrt im militärischen Bereich genutzt. Die zivile und private Nutzung ist aber wünschenswert. Zum einen eröffnet die Drohnentechnik neue Möglichkeiten bei der Beobachtung des Klimas und ebenso der Naturraumüberwachung. Zum anderen können aufgrund der günstigen Preise in der Anschaffung und im Unterhalt vielfältige Daten mit Hilfe der unbemannten Helfer gewonnen werden. Mittels der Drohnen lassen sich im Gegensatz zu Ballons und Flugzeugen auch das Klima und Wetter in Häuserschluchten bzw. knapp über Gebäuden beobachten – sofern dies gesetzlich erlaubt ist. Möglich ist die Beobachtung sowohl an einem fixen Standort, als auch über einer Wegstrecke. Zusätzlich ist die Möglichkeit vorhanden, eine genauere horizontale bzw. vertikale Untersuchung der Stadtatmosphäre durchzuführen, sowie theoretisch präzisere Messungen zwischen Stadthindernisschicht (urban canopy layer) und Übergangsschicht (urban turbulent wake layer). Eine weitere Idee stellt das Verfolgen von Personen in der Stadt dar, was bisher aus der „Vogelperspektive“ unmöglich war. Die zu verfolgende Person kann beispielsweise mit einer Wärmebildkamera beobachtet werden, um folglich neuartige Wechselwirkungen zwischen der Stadtstruktur (z.B. der Oberflächenabstrahlung) und dem menschlichen Organismus zu erhalten [vgl. ALLBACH; HENNINGER, 2013]. Unter Mobile Mapping wird die Erfassung raumzeitlicher Phänomene mit Hilfe einer bewegten Multisensorplattform definiert, die das Ziel hat, strukturierte Objektinformationen aus den erfassten Daten abzuleiten [vgl. NEITZEL; ET AL, 2011]. Mittlerweile bietet sich die Möglichkeit, mit Hilfe von Drohnen 3D-Modelle durch die Nutzung der Luftbildphotogrammetrie zu erstellen. Zudem sind erste Apps in Betrieb, die z.B. DJI Drohnen auf dem Android und iOS Betriebssystem zu einem 3D-Scanner machen [vgl. KNABEL, 2016]. Weitere Beispiele für die Nutzung von Multicoptern im städtischen Raum sind logistische Aufgaben wie z.B. die Auslieferung von Paketen. Auch wenn dies zurzeit eher als Marketing von Amazon, UPS, DHL usw. angesehen werden kann, gibt es durchaus vorstellbare Szenarien [vgl. WISCHMANN, 2015]. Multicopter, die mit Wärmebildkameras ausgestattet sind, können nicht nur zur Personensuche und zum Auffinden von Brandnestern genutzt werden, sondern auch zur Identifizierung von defekten Solarmodulen eingesetzt werden. Defekte Module können erhitzen, mindern die Gesamteffizienz des Solarsystems und liefern keinen Strom. Die einzelnen Module sind zu Blöcken zusammengeschaltet, weshalb es sich bisher als schwierig erweist, vom Boden aus das ausgefallene Modul zu identifizieren. Mittels der Thermographie aus der Luft lässt sich dies von oben erledigen [vgl. SCHLEE, 2016]. Für die Kontrolle von PV-Anlagen in Deutschland und dem noch erheblich ausbaufähigen Potential an weiteren Anlagen, eröffnen sich große Marktchancen für einen kommerziellen Einsatz von Drohnen und sind eine geeignete Alternative zu Hubsteigern oder Kransteigern [vgl. IKEN, 2016]. In Katastrophenszenarien erweist sich die Nutzung von unbemannten Luftfahrzeugen (UVAs) als erfolgreich. Dieses Einsatzmittel kann z. B. zur Ortung von vermissten bzw. verschütteten Personen benutzt werden. Auch Funksignale von LVS-Geräten bei der Lawinenverschüttetensuche (LVS) können von den UVAs geortet und detektiert werden. Dadurch kann bei der Suche nicht nur Zeit gespart werden, sondern auch den Helfern bzw. Suchern wird ein besserer Schutz geboten, da sie nicht permanent den Gefahren ausgesetzt sind. [vgl. ANDERT; ET AL, 2013]. Ebenso können die Copter zum sogenannten Smart Farming eingesetzt werden, was von der Deutschen Landwirtschaft-Gesellschaft (DLG) positiv bewertet wird. Der Entwicklung von Smart Farming bzw. „Networked Farming“ werden mehr Chancen als Risiken beigemessen – die Bauern sollten zunehmend im Sinne des Precision Farming aufrüsten, um dann Smart Farming betreiben zu können. So ist es beispielsweise möglich aus aufgenommenen Fotos ein Gesamtbild zusammen zu setzen, welches als

Biomassekartierung oder Dokumentation von Hagel-, Wasser-, oder Wildschäden genutzt werden kann [vgl. HOFFMANN, 2014]. Derzeit kommen Drohnen in der Landwirtschaft häufig zur Bestimmung verschiedener Vegetationsindizes mittels Multispektralkameras zum Einsatz. Dadurch lassen sich unter anderem der Blühbeginn und die Wuchshöhe diverser Kulturen feststellen. Ein zukünftiges Nutzgebiet stellt die Ausbringung von Nützlingen zur biologischen Schädlingsbekämpfung dar, beispielsweise bei Schlupfwespen-Gelegen im Maisbestand [vgl. PAAR, 2015]. Landwirte können durch den Einsatz von Infrarot-Aufnahmen (NDVI) feststellen, wo mögliche Probleme entstehen können bzw. wo sich kranke Pflanzenbestände befinden. Gesunde Pflanzen reflektieren die Infrarotstrahlung, wohingegen kranke Pflanzen dies nicht können. Dadurch ist die frühzeitige Erkennung und Visualisierung kranker Bestände möglich, bevor die Pflanzen welken. Auch Pflanzenschutzmittel können punktgenau zum Einsatz kommen. Weiterhin lassen sich z.B. vermeintliche Schädlinge, wie Wildschweine, jagen. Auch Rehkitze lassen sich durch eine Luftbeobachtung vor Mähern schützen. [vgl. SCHLEE, 2016].

### 3.1 Wetterdaten – Klimamonitoring mit Multicoptern

Im Allgemeinen sollten Monitoringmethoden genaue und kontinuierliche Erfassungen des Beobachtungsgegenstandes gewährleisten. Die dabei entstandenen Zeitreihen bilden die Grundlage für Prognosen. Vor allem im Bereich der Raumplanung spielen Zeitreihen und die dazugehörigen Zeitreihenanalysen eine bedeutende Rolle. Als Beispiel gelten Niederschlagsmengen und Temperaturschwankungen in der Raumplanung und in der Klimatologie, die auch in der Verkehrsplanung einbezogen werden [vgl. STREICH, 2005:211ff]. Des Weiteren kann man eine Unterscheidung zwischen deduktivem und induktivem Monitoring vornehmen. Beim deduktiven Monitoring werden Daten in ihrer Vielfalt und allgemeinen Form erhoben und gesammelt. Nach deren Auswertung werden sie zu einer Aussage zusammengefasst. Beim induktiven Monitoring hingegen wird innerhalb der Wissenschaft durch Beobachtungen von Phänomenen eine abstrahierende Folgerung abgeleitet. Bei induktiven Monitoring-Ansätzen in der räumlichen Planung ist dies jedoch nicht der Fall, da einzelne Personen unbewusst dieselben Phänomene beobachten. [vgl. ZEILE, 2011]. Die Geschichte der Klimamessung lässt sich grob in vier Abschnitte unterteilen: Experimentelle Messungen (1592-1700), erste regelmäßige Messungen (1700-1850), frühe Messnetze (1780-1850) und moderne Messnetze (seit 1850). In der heutigen Zeit zählen auch nicht-bodengebundene Messsysteme dazu. Der internationale Austausch der Daten eines Messnetzes von mehr als 10.000 Bodenstationen wird von der World Meteorological Organization (WMO) geregelt. Über 1000 Bodenstationen lassen mehrmals täglich Wetterballone mit Radiosonden aufsteigen. RADAR, LIDAR und SODAR zählen überwiegend zu den bodengestützten Fernerkundungsverfahren. Ebenso ist eine Erkundung durch Flugzeuge und Satelliten möglich, wobei die Atmosphäre mit Radio-, Licht- bzw. Schallwellen erkundet wird [vgl. ZAMG, 2016]. Das Sammeln von Daten durch mobile Messungen sowie Urban Sensing Ansätze ist für die Meteorologie bzw. die Stadtklimatologie von großem Interesse. Ebenso offeriert dies einen enormen Mehrwert für das Klima-Monitoring [vgl. ALLBACH, HENNINGER, 2013]. Bei mobilen Klimamessungen oder Feldexperimenten wird auf feste Messstandorte verzichtet, sie ermöglichen jedoch Messungen mit spezieller Sensorik und diversen Verfahren. Mobile Messmethoden sind besonders geeignet, um das Klima im städtischen Raum zu untersuchen. Mit Hilfe von Fahrzeugen, Fahrrädern oder gar zu Fuß können verschiedene Messverfahren durchgeführt werden [vgl. OTTE, 1999:298]. Das Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V. (TROPOS), die Universität Tübingen und die Technische Universität Braunschweig testen unbemannte Luftfahrzeuge um die schädlichen Feinstaub-Partikel (Aerosole) auf ihre Größe und Konzentration hin zu untersuchen. Das TROPOS betreibt eine Messstation, die Teil des globalen Erdbeobachtungssystems der WMO ist und den Kern der jüngsten Wolkenmesskampagne ist. Die Drohne namens ALADINA vom Typ „Carolo P360“ ist am Institut für Luft- und Raumfahrtssysteme der TU Braunschweig entwickelt worden und hat eine Spannweite von ca. 3,6 Metern bei ca. 22 kg Gewicht mit einer Traglast von ca. 2,5 kg und erreicht eine maximale Geschwindigkeit von ca. 80 km/h. Der verwendete Akku ermöglicht eine Flugzeit von ca. 30 Minuten. Frau Dr. Wehner von TROPOS sieht die Vorteile des wissenschaftlichen Drohnen-Einsatzes vor allem darin, dass die unbemannten Flugzeuge, bei atmosphärischen Aerosol-Messungen, die Lücke zwischen Langzeitmessungen vom Boden und kostenintensiven Hubschraubermessungen schließen könnten [vgl. WESTPHAL, 2013]. Der verwendete Drohnentyp ähnelt allerdings eher einem großen Modellflieger und hat auch die Stärken und Schwächen wie ein Flugzeug im Vergleich zu einem Multicopter. Durch den Einsatz von Mikrocontrollern und Sensoren ist es möglich eine mobile, autonome, leichte, kostengünstige und modulare Wetterstation zu entwickeln [vgl.



ALLBACH; HENNINGER, 2013a+b & ALLBACH; HENNINGER; DEITCHE, 2014]. Bei mobilen Messungen stellt ein Multicopter ein neuartiges Trägersystem für Messinstrumente dar.

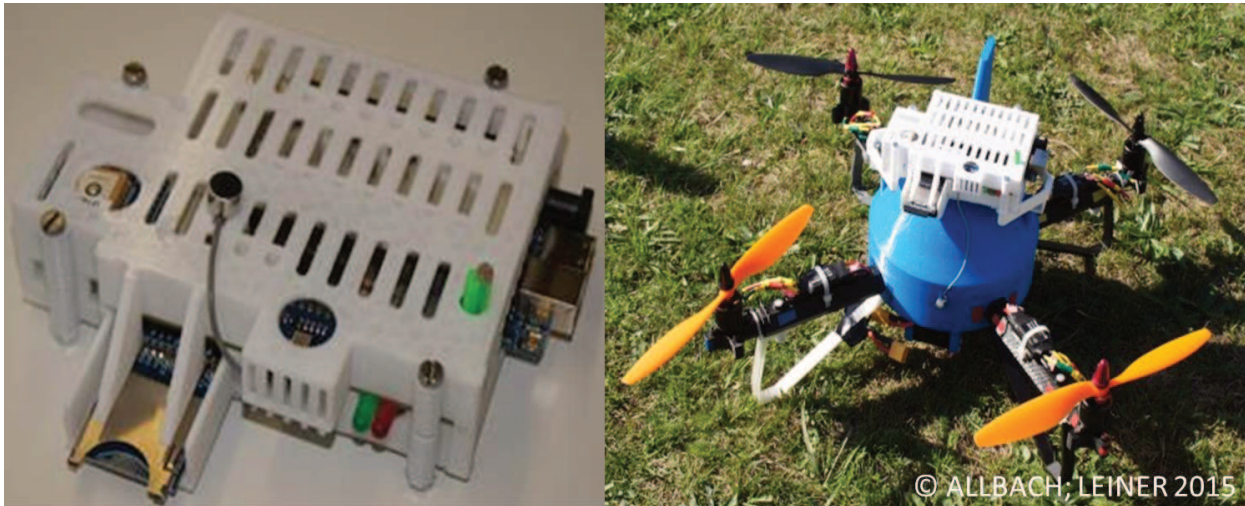


Abb. 2: Mikrocontrollerbasierte Wetterstation & Copter als Trägersystem der Wetterstation [EIGENE DARSTELLUNG, 2014, 2015].

## 4 COPTER ALS TRÄGERSYSTEME – ENTWICKELTE COPTERVARIANTEN

### 4.1 Quadrocopter aus dem 3D-Drucker

Im Jahr 2013 begann durch uns die Entwicklung eines Quadrocopters aus dem 3D-Drucker. Die Besonderheit des Copters ist, dass die komplette Rahmenkonstruktion (fast alles außer der Elektronik) im 3D Druckverfahren erstellt wird (Abb. 3 links-oben). Die Drohne/Copter soll zum einen bei Workshops der Hochschule Kaiserslautern als kostengünstige und gleichzeitig innovative Form der MINT-Förderung (aus den Begriffen Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik zusammengesetzt) für Schülerinnen und Schüler eingesetzt werden (Abb. 3 rechts-oben) und gleichzeitig als erster Prototyp für eine leicht reproduzierbare Sensor-Träger-Plattform dienen (Abb. 2 rechts). Mittlerweile gibt es auch vergleichbare Projekte für fortgeschrittene „Bastler“ mit Zugriff auf 3D-Drucker (z.B. die IRIS+ Drohne oder auf der Crowdfunding-Plattform Indiegogo die BonaDrone Mosquito). Bei der Produktion mit 3D-Druckern wurden fast ausschließlich nicht professionelle 3D-Drucker eingesetzt, die in einem anderen Schülerinnen-Projekt konstruiert wurden [vgl. RHEINPFALZ, 2014a+b]. In diversen evaluierten Workshops und Aktionstagen der Hochschule Kaiserslautern wurde in den Jahren 2015 und 2016 dieser Quadrocopter von Schülerinnen und Schülern gebaut, geflogen und mit einer äußerst positiven Resonanz bewertet. Das Ziel eines kostengünstigen, robusten und Interesse weckenden Mediums konnte erfüllt werden. Das Ziel eine geeignete Sensor-Träger-Plattform mithilfe dieses Copters zu schaffen, konnte allerdings nur bedingt erfüllt werden. Die Kluft zwischen Kostengünstigkeit, Einfachheit bei gleichzeitiger Robustheit und möglichst langer Flugzeit ist nur schwer erreichbar. Daher wurde nach einer Lösung gesucht, einen Multicopter zu konstruieren, der eine möglichst lange Flugzeit aufweisen kann bei gleichzeitiger Nutzung als Sensor-Plattform-Träger. Zu erwähnen ist, dass die Reichweite und Flugdauer schon immer ein Streitpunkt ist. Es ist ein theoretischer Wert. Oftmals wird dieser nur erreicht, wenn die Drohne „ruhend“ in der Luft steht und die Kamerasensorik deaktiviert ist. Dies gilt nicht nur für die günstigen Drohnen, sondern auch für die Drohnen in der Preisklasse um ca. 40000 Euro [vgl. IKEN, 2016:44FF]. Dennoch soll mit diesem Paper rechnerisch und theoretisch dargelegt werden, wie ein Langzeit-Flug-Copter aussehen könnte und wie durch Solartechnik die Flugdauer weiter gesteigert werden kann.

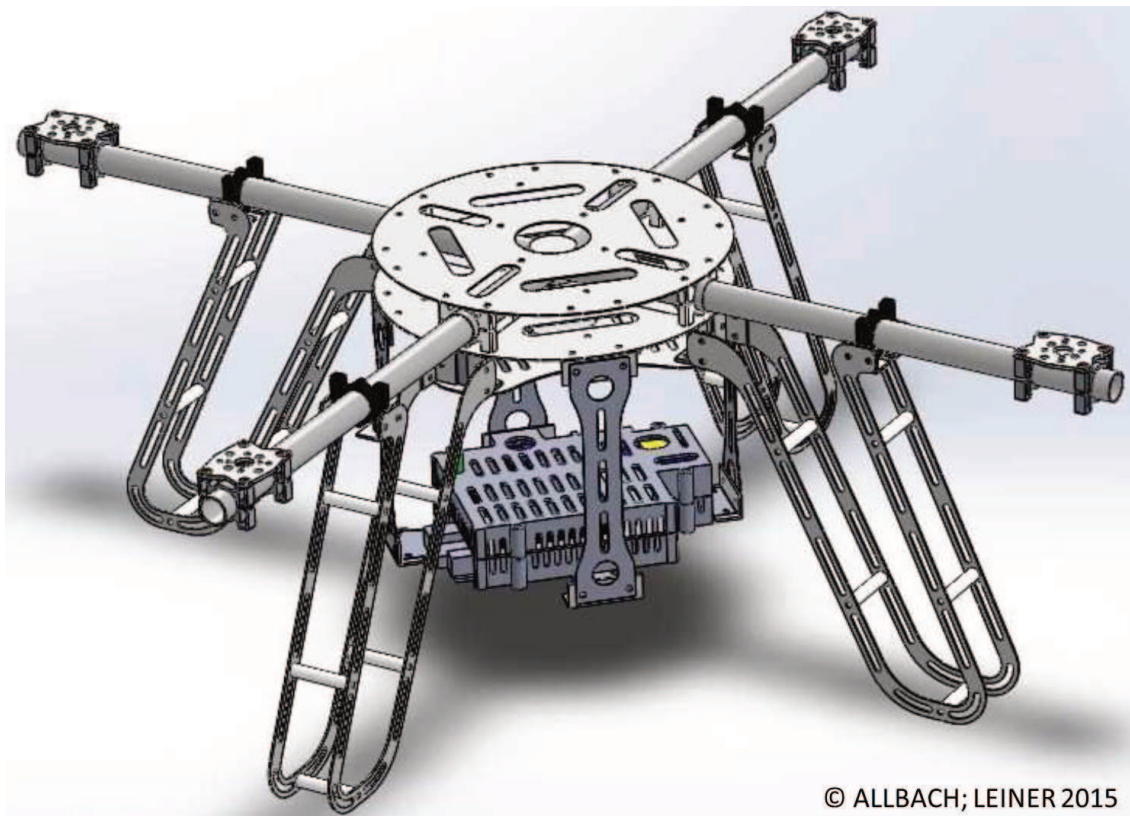


Abb. 3: 3D-Drucker & Workshops für SchülerInnen [EIGENE DARSTELLUNG, 2014, 2015].

#### 4.2 Langflug Quadrocopter

Um eine möglichst lange Flugzeit zur Detektion von Umwelteinflüssen durch die Wetterstation zu gewährleisten, wird ein Quadrocopter entwickelt, welcher die Wetterstation tragen kann und aufgrund der geforderten, langen Flugzeit, möglichst leicht ist. Aus konstruktiver und materialtechnischer Sicht kommt für den Prototyp das Material Carbon (CFK) zum Einsatz. Da der Akku einen nicht unerheblichen Beitrag zur Gesamteffizienz des Flugsystems beiträgt, wird untersucht, unter welchen Bedingungen und Spezifikationen ein Lithium-Polymer-Akku die höchste Energiedichte aufweist. Hierfür wurde eine umfangreiche Benchmarkanalyse des vorhandenen Akkumarktes durchgeführt und die Parameter Gewicht und Energieinhalt untersucht. Hier stellt sich heraus, dass nach einer statistischen und parametrischen Analyse verschiedener LiPo-Akkus, diejenigen die höchste Energiedichte aufweisen, welche auch die höchste elektrische Leistung in Watt (W) innehaben. Es zeigt sich, dass genau jene Akkus, eine Energiedichte von bis zu 19 Watt pro 100 Gramm Eigengewicht aufweisen. Die Konstruktionsstudie (Abb. 4) zeigt, dass mit einem Quadrocopterrahmen in Leichtbauweise aus Carbon und einer effektiven Auslegung hoch effizienter Leistungselektronik nach einer umfangreichen Benchmark- und Berechnungsanalyse eine maximale, effektive Flugzeit von 60 Minuten möglich wird. Zu diesem Zweck wurde eine umfangreiche Analyse des bestehenden Marktes im Bereich Multicopter-Brushlessmotoren und Luftschrauben durchgeführt und auf die zu realisierende Konstruktionsstudie angewendet. Die effizienteste Leistungselektronik-Kombination gewährleistet hier eine praktische Flugzeit von 60 Minuten. Ebenso konnte ein Trend in der Effizienzsteigerung beobachtet werden. Je größer die verwendeten Luftschrauben des Multicoptersystems sind, desto effizienter setzen diese die Leistung der Motoren mechanisch in die benötigte Schubkraft um. Ebenso erfahren die Motoren selbst eine Effizienzsteigerung, je größer sich ihre Bauform zeigt. Die Gesamteffizienz des Multicoptersystems steigt somit mit zunehmender Größe der Leistungskomponenten.



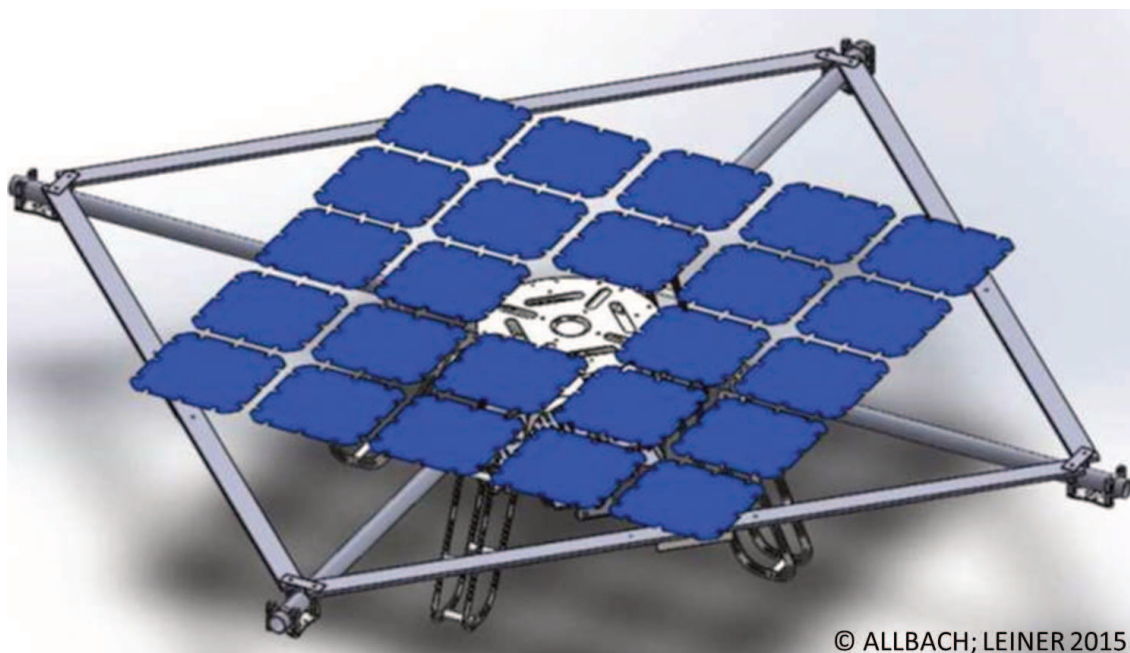


© ALLBACH; LEINER 2015

Abb. 4: Langflug Quadrocopter [EIGNE DARSTELLUNG, 2015].

### 4.3 Langflug Quadrocopter (mit Solar)

Eine weitere Konstruktionsstudie (Abb. 5) zeigt, wie sich die Flugzeit, bei der Erweiterung des Designs mit unterschiedlich leistungsstarken Solarsystemen, verhält. Hier zeigt sich, dass die bestehende Fluggerätegröße keinen positiven Flugzeiteffekt durch eine Solarsystemintegration erfährt. Je größer die Konstruktion und somit auch die Leistungselektronik und die Luftschrauben werden, desto effizienter wird das Gesamtsystem des Quadrocopters. Durch die Integration eines effizienten Solarsystems in einem größeren Quadrocopter-Design mit einem Motorachsenabstand von 1400 Millimeter, kommt es zu einer Flugzeitsteigerung um bis zu 200 Prozent. Hier kann eine maximale Flugzeit von 160 Minuten bei optimalen Wetterbedingungen erreicht werden.



© ALLBACH; LEINER 2015

Abb. 5: Langflug Quadrocopter (mit Solar) [EIGNE DARSTELLUNG, 2015].



## 5 KLIMAMONITORING - BEISPIEL

Nachfolgend wird ein kurzes Beispiel für die Detektion von Umwelteinflüssen bzw. eine neue Form des Klimamonitoring gezeigt.

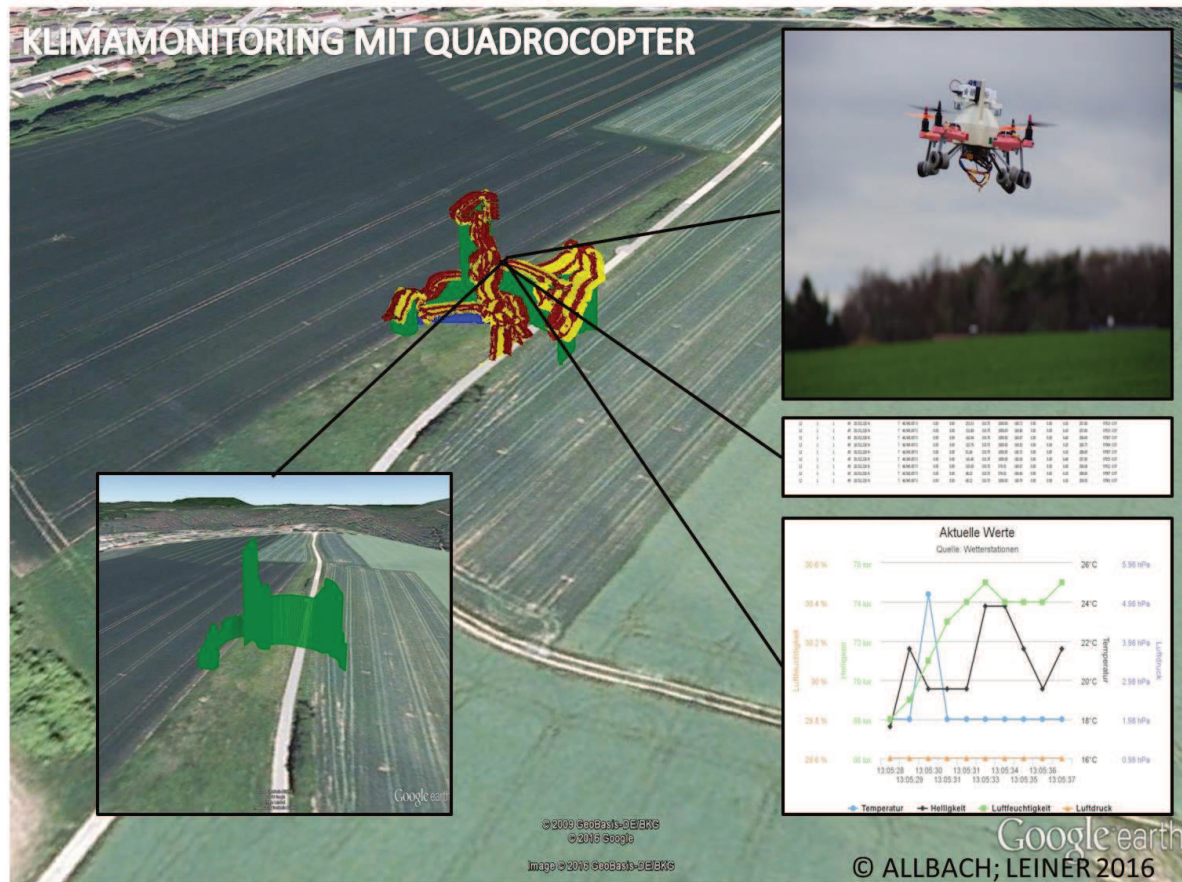


Abb. 6: Der Copter als Sensing-Plattform [EIGENE DARSTELLUNG, 2015, 2016].

Die Abb. 6 zeigt den Verlauf eines Testflugs des Copters aus dem 3D-Drucker mit montierter Wetterstation. Die Flugdauer beträgt ca. sieben Minuten mit einer rudimentären Basis-Wetterstation von ca. 200 Gramm. Die Darstellung der aufgenommenen Daten erfolgt über dem Umweg des Online verfügbaren Urban Sensing Systems. Diese selbstentwickelte Sensing Plattform ist immer noch in Entwicklung und nicht fertig gestellt. Die Daten wurden manuell über eine SD-Karten-Importierfunktion in eine Datenbank eingespielt. Nicht valide Daten (z.B. keine GPS-Position) werden hierbei automatisch durch einen Importfilter aussortiert [vgl. ALLBACH; HENNINGER; DEITCHE, 2014]. Zur Darstellung der Werte wurde ein Mixchart gewählt. In dieser Version erfolgte die Visualisierung im Urban Sensing System mit dem offenen und freien Tool Highchart, das zu Testzwecken integriert wurde. Weiterhin sichtbar in der Abbildung ist das Höhenprofil des Fluges, verschiedene Daten wie z. B. die Geoposition, Datum, Uhrzeit sowie die Wetterdaten bestehend aus Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Lautstärkemessung und Lichthelligkeit. Ebenfalls lässt sich das Höhenprofil des Flugs mittels KMZ-Import in Google Earth darstellen. Geschwindigkeit, Lagesensoren bzw. die gesamte Telemetrie des Copters lassen sich ebenfalls auslesen.

## 6 CONCLUSION

Multicopter und Drohnen eignen sich sehr gut um Schülerinnen und Schüler neugierig auf Technik zu machen und sich intensiver mit MINT-Themen auseinander zu setzen. Die angebotenen Workshops erfreuen sich einer großen Beliebtheit bei den SchülerInnen und können einen Beitrag leisten um zukünftige Fachkräfte im MINT-Bereich zu gewinnen.

Es konnte gezeigt werden, dass Mithilfe der 3D-Druck Technologie ein durchaus robuster und kostengünstiger Quadrocopter gebaut werden kann. Ersatzteile lassen sich ebenfalls gut erstellen. Es wurde gezeigt, dass ein Quadrocopter, welcher mit Hilfe eines 3D-Druckers realisiert wurde, durchaus als aeronautische Trägerplattform zur Detektion von Umwelteinflüssen bzw. als eine Art Sensor-Plattform

dienen kann. Kritisch zu sehen ist allerdings die geringe Flugzeit des 3D-Druck-Copters, das verwendete PLA-Druck-Material ist deutlich schwerer als Leichtbaumaterialien. Außerdem musste der Copter bewusst durch den Einsatzzweck in Workshops robust ausgelegt werden. Aus diesem Grund zeigte eine zweite Konstruktionsstudie, dass durch eine effiziente Leichtbauweise und eine optimierte Auslegung hoch effizienter Leistungselektronik, eine Flugzeitexpansion bis auf 60 Minuten möglich ist. Hierdurch können Wetterdaten im größeren Umfang und statistischer Qualität erfasst werden. In einer dritten Konstruktionsstudie konnte aufgezeigt werden, dass durch die Integration einer effizienten Solaranlage die Flugzeit bis auf 160 Minuten gesteigert werden kann. Hierzu ist allerdings eine optimale Wetterlage und die damit verbundene direkte Sonneneinstrahlung auf die Solarkollektoren Voraussetzung. Durch die Konstruktionsstudien wurde eine evolutionäre Weiterentwicklung der Trägerplattform zur Detektion von Umwelteinflüssen mit Hilfe einer Wetterstation aufgezeigt. Eine Trägerplattform, welche eine Flugzeit von 60 Minuten gewährleistet, dient der Erfassung von Umweltdaten wesentlich besser.

Allgemein wird die vorgestellte Technik erheblich das tägliche Leben beeinflussen. Drohnen bieten für Monitoring Aufgaben eine immense Kosteneinsparung. Weiterhin sind sie auch in engen urbanen Strukturen, wie z.B. Häuserschluchten navigierbar und bieten die Möglichkeit in der Luft schwebend auf der Stelle zu stehen. Durch die Copter-Technik sind Vor-Ort-Messungen von Daten aller Art umsetzbar. Die Technologie der Multicopter hat das Potential ein Bindeglied zwischen Top-down Verfahren und Bottom-up Verfahren bei Monitoring-Aufgaben zu leisten. Rechtlich gesehen müssen die damit einhergehenden Möglichkeiten klar geregelt werden. Sicherungssysteme, wie z.B. Redundanzen bei der Energieversorgung und programmiertes Verhalten bei Abriss des Funksignals, müssen zwingend vorhanden sein. Trotz der vielen Gefahren dieser Technik ist die Drohnentechnologie ein Schlüssel für die Umsetzung von Smart Cities. Scheinbar ist es wie bei vielen andern Technologien vorher ... je stärker bzw. mächtiger eine Technologie ist, desto größer können auch die Gefahren sein, die von ihr ausgehen.

## 7 REFERENCES

- ALLBACH, Benjamin: Augmented City Kaiserslautern - Web-basiertes Wissensmanagement in Mixed Reality Umgebungen. Kaiserslautern, 2010.
- ALLBACH, Benjamin; HENNINGER, Sascha: New Methods of Climate Monitoring, in: Schrenk, M.; Popovich, V.; Zeile, P.: Proceedings of RealCORP 2013, Rom, Wien, 2013.
- ALLBACH, Benjamin; HENNINGER, Sascha: Mobile Embedded Climate Sensing 2.0 in: Schrenk, M.; Popovich, V.; Zeile, P.: Proceedings of RealCORP 2013, Rom, Wien, 2013.
- ALLBACH, Benjamin; HENNINGER, Sascha; DEITCHE, Eugen: An Urban Sensing System as Backbone of Smart Cities, in: SCHRENK, Manfred; POPOVICH, Vasily; ZEILE, Peter; ELISEI, Pietro: Proceedings of RealCORP 2014, Wien, 2014.
- ALLBACH, Benjamin; HENNINGER, Sascha; GRIEBEL, Oliver: Mobile Tools for Urban Sensing and Climate Monitoring in Smart Cities, in: SCHRENK, Manfred; POPOVICH, Vasily; ZEILE, Peter; ELISEI, Pietro: Proceedings of RealCORP 2014, Wien, 2014.
- ANDERT, F.; Batzdorfer, S.; SCHULZ, H.; INNINGER, W.; RIESER, A.: UNTERSUCHUNGEN ZUM EINSATZ VON UAVs BEI DER LAWINENRETTUNG, 2013. [Internet: <http://www.dglr.de/publikationen/2014/301158.pdf>].
- BACHFELD, Daniel: Quadrocopter-Know-how. In: c't Hacks Hardware, 13 (03), S 42-51, 2013.
- BENTELER-SGL: Faserverbundwerkstoff CFK. Website Benteler-SGL, 2015. [Internet: <http://www.benteler-sgl.de/produkte/faserverbundwerkstoff-cfk/index.html>].
- BRUNNER, Dirk: Drohne Gefährdung, Risiko und Verletzungen, München, 2015. [Internet: [http://www.technikconsulting.eu/Analyse/Gef%C3%A4hrdung\\_Drohne.html](http://www.technikconsulting.eu/Analyse/Gef%C3%A4hrdung_Drohne.html)].
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: Kurzinformation über die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen, Referat Z 25, Druckvorstufe, Hausdruckerei, Bonn, 2014.
- BÜCHI, Roland: Faszination Quadrocopter. 1. Auflage, Baden-Baden: Verlag für Technik und Handwerk neue Medien GmbH, 2013a.
- BÜCHI, Roland: Brushless-Motoren und –Regler. 1. Auflage, Baden-Baden: Verlag für Technik und Handwerk neue Medien GmbH, 2013b.
- GARTNER, Thomas: Flugzeugbau einst, heute und morgen. Lufthansa Technik – acatech. Seite: 7, 2009. [Internet: [http://www.acatech.de/fileadmin/user\\_upload/Baumstruktur\\_nach\\_Website/Acatech/root/de/Material\\_fuer\\_Sonderseite\\_n/Akademietag/Journalistenworkshop/acatech\\_muc09plus.pdf](http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseite_n/Akademietag/Journalistenworkshop/acatech_muc09plus.pdf)].
- GEBHARDT, Andreas: Generative Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping-Tooling-Produktion, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, ISBN 978-446-43651-0. Seiten: 11, München, 2013.
- HOFFMANN, K.: Automatisch bis in die letzte Furche, 2014.
- IKEN, Jörn: Zivile Drohnen im Einsatz, Sonne Wind & Wärme, 01+02/2016, Bielefeld.
- KNABEL, Jakob: Diese kostenlose App macht aus einer Drohne einen 3D Scanner, 2016.
- LANDESBETRIEB MOBILITÄT RHEINLAND-PFALZ: Drohnen (UAS), Koblenz, 2015. [Internet: <https://www.lbm.rlp.de/Aufgaben/Luftverkehr/Drohnen-UAS/>].
- LENZ, Björn: Akkuvergleich und Energiedichte verschiedener Akkutypen. AKKU-abc, 2015. [Internet: <http://www.aku-abc.de/aku-vergleich.php>] (03.08.2015).

- NEITZEL, Frank; KLONOWSKI, Jörg; SIEBERT, Sebastian; DASBACH, Jan-Philipp: Mobile 3D Mapping mit einem low-cost UAV-System am Beispiel der Deponievermessung, 2011.
- NOÉ, Isabell: Das sollten Drohnenpiloten wissen, N-TV, 2015. [Internet: <http://www.n-tv.de/ratgeber/Das-sollten-Drohnenpiloten-wissen-article16341631.html>].
- OTTE, U.: Meßnetze, Meßverfahren. In: KERSCHGENS, Michael [Hrsg.]: Stadtklima und Luftreinhaltung. Berlin, 1999.
- PAAR, Johannes: Drohne für Luftbilder und Schädlingsbekämpfung, 2015.
- PASSERN, Ulrich: Das Lipo-Buch – Grundlagen und Praxistipps. 1. Auflage, Baden-Baden: Verlag für Technik und Handwerk neue Medien GmbH, 2013.
- RHEINPFALZ: 3D-Druck ist ein Trendthema, Überregionale Ausgabe Nr. 166, Montag, 21. Juli 2014, 2014.
- RHEINPFALZ: Neugierig auf Technik, Pfälzische Volkszeitung, Nr. 180, Mittwoch, 06. August 2014, 2014.
- SCHLEE, Hannes: Drohnen – Fliegende Agrar-Helfer, 2016. [Internet: <http://agrarblogger.de/2014/09/05/drohnen-fliegende-agrar-helfer/>].
- STREICH, Bernd: Stadtplanung in der Wissensgesellschaft, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2005.
- SOLMECKE Christian; NOWAK, Fabian: Zivile Drohnen – Probleme ihrer Nutzung, 2014.
- WESTPHAL, Chris: Drohne ALADINA („Carolo P360“) misst und untersucht Feinstaub, 2013.
- WESTPHAL, Chris: Drohnen Multicopter Quadrocopter, Einhausen, 2015. [Internet: [www.drohnen.de](http://www.drohnen.de)].
- WISCHMANN, Franziska: 3 neue Wege der Paketzustellung, 2015. [Internet: <http://www.smart-living-blog.de/drohne-paketbox-oder-kofferraum-3-neue-wege-der-paketzustellung/>].
- ZEILE, Peter: Städtebauliche Methodenentwicklung mit GeoWeb und Mobile Computing – Untersuchung über die Fortentwicklung des städtebaulichen und raumplanerischen Methodenrepertoires angetrieben durch technologische Neuerungen im Internet. Weblog des Forschungsprojektes. TU Kaiserslautern, Fachgebiet CPE Prof. Streich. Kaiserslautern. 2011. [Internet: <http://geoweb.arubi.uni-kl.de>].
- ZAMG: Klimamessung von Galilei bis Meteosat, 2016. [Internet: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimaforschung/klimamessung/geschichte>].